Teorías de la difracción de ondas electromagnéticas por redes de volumen: Una revisión

Pavel Cheben
National Research Council, Institute for National Measurement Standards
Ottawa, Ontario, Canada K1A 0R6
e-mail: pavel.cheben@nrc.ca

María L. Calvo
Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid
Ciudad Universitaria, Madrid 28040, Spain
e-mail: mlcalvo@eucmax.sim.ucm.es

Recibido el 28 de mayo de 1997; aceptado el 8 de mayo de 1998

Se presenta una revisión de las teorías de la difracción de ondas electromagnéticas por redes de volumen. En el enfoque de este trabajo se encuentran las teorías de los siguiente grupos: teorías de ondas acopladas, teorías modales, teorías de dispersión múltiple y teorías electromagnéticas, siempre y cuando sean apropiadas para el análisis de redes de volumen. Se incluye también una revisión de teorías y métodos con menor impacto en el campo estudiado, tales como teorías de medio efectivo, método de difracción por el entorno, método de elementos finitos o algoritmos microgenéticos. Se recogen un total de 225 publicaciones seleccionadas que abarcan un período de aproximadamente cien años: 1891–1997.

Descriptores: Teorías de la difracción; redes de difracción; redes holográficas de volumen

We present a revision for the existing theories on diffraction of electromagnetic waves by volume gratings. We have focused our attention to the following groups of theories: coupled waves theories, modal theories, multiple dispersión theories, and electromagnetic theories of gratings, provided they were appropriate to analysis of volume diffraction gratings. We also include a revision of some other theories and methods having minor impact in this field as: effective medium theory, boundary diffraction method, finite element method, and micro genetics algorithms. We include a total of 225 selected references covering a period of approximately one hundred years: 1891–1997.

Keywords: Diffraction theories; diffraction gratings; holographic volume gratings

PACS: 42.25.Fx; 42.40.Eq; 42.82.Ds

1. Resumen histórico

Una gran mayoría de los modelos teóricos aplicables al análisis de la difracción de haces luminosos por redes de volumen tiene su origen en las teorías elaboradas fundamentalmente a principios del siglo XX para descripción de la difracción de electrones, neutrones y rayos X en cristales o de ondas electromagnéticas en redes acústicas.

Así, por ejemplo, Ewald elaboró una teoría de ecuaciones de dispersión [1–4] al estudiar la difracción de rayos X en cristales. De sus estudios surgen los conceptos empleados posteriormente en las teorías modales. La teoría dinámica, en su forma actual, fue elaborada por Laue [5]. Bethe desarrolló una teoría análoga para difracción de electrones [6]. La teoría de Fujiwara [7] es particularmente de gran interés en relación con el fenómeno de dispersión múltiple. Un resumen de las contribuciones más relevantes al campo mencionado se puede encontrar en Batterman y Cole [8] (hasta 1964). La introducción a la teoría dinámica de difracción de rayos X se puede complementar con los trabajos de Zachariasen [9], James [10], Azároff *et al.* [11] y Pinsker [12].

Las teorías de difracción de haces luminosos por redes acusto-ópticas son especialmente interesantes para caracterizar redes holográficas de volumen. Brillouin [13] estudió las fluctuaciones acústicas en líquidos y sólidos mediante la difracción de ondas electromagnéticas. En sus trabajos aparecen por primera vez conceptos tales como la interacción de tipo Bragg, sincronismo de fase y conservación del momento, relacionados con la difracción de la luz por redes de volumen. Sus predicciones fueron comprobadas experimentalmente en el año 1932 por Lucas y Biquard [14] en Francia y por Debye y Sears [15] en Estados Unidos. Sin embargo, en ambos casos no se llegaron a observar las resonancias correspondientes a un régimen de Bragg predichas por Brillouin [véase Ref. 13, Ec. (29)] a causa de un valor muy bajo de la constante $Q^{(a)}$ de la red acústica empleada en los experimentos ($Q \approx 1.5$). Debye y Sears atribuyeron erróneamente la multiplicidad de los órdenes de difracción a los armónicos de la red acusto-óptica. El fenómeno fue explicado correctamente por Brillouin [16] mediante la interacción múltiple de luz por la red acústica. Este trabajo constituyó la base para las teorías de dispersión múltiple. La técnica de representación del campo electromagnético en términos de funciones propias del medio perturbado (introducida por Brillouin) se emplea actualmente en teorías de modos característicos.

Los trabajos de Raman y Nath [17–21] son de primera importancia en el desarrollo de las técnicas de ondas acopladas. En ellos se introdujo por primera vez la ecuación de onda para obtener un sistema de ecuaciones acopladas [véase Ref. 21, Ecs. (1)–(3)], hoy conocidas como ecuaciones de Raman-Nath, a partir de las cuales es posible determinar las amplitudes de los órdenes difractados.

Los trabajos clásicos sobre difracción de la luz por redes acústicas, realizados por Extermann y Wannier [22], Aggrawal [23], Mertens [24, 25], Phariseau [26, 27], David [28] y ante todo la teoría de Klein y Cook [29], son particularmente relevantes en el desarrollo de la teoría de ondas acopladas.

La investigación en materiales holográficos de gran espesor iniciada por Denisyuk[(b)] [30] en la década de los sesentas orientó el interés de los expertos en holografía hacia los modelos teóricos arriba mencionados. La selectividad angular y espectral teóricamente anticipada y experimentalmente comprobada para redes de Bragg acústicas encontró aplicaciones en el almacenamiento masivo de información [34–36], holografía en color [37] y hologramas reconstruibles con luz blanca [38–41].

Leith *et al.* [42] y Gabor y Stroke [43] analizaron la dependencia angular y espectral de redes holográficas de volumen partiendo de la integral de Kirchhof y de la aproximación de Born de primer orden. Sin embargo, la suposición de una perturbación débil fue inconsistente con el carácter resonante de una red de Bragg. Burckhardt [44] utilizó métodos numéricos para resolver las ecuaciones acopladas y calcular las eficiencias de difracción en el caso de una red sinusoidal dieléctrica. Saccocio [45] aplicó la teoría dinámica de Batterman y Cole [8] a redes holográficas.

Un interesante trabajo de Kogelnik del año 1967 [46], poco citado en la literatura, aproxima la red de volumen a un resonador Fabry-Perot y ofrece una solución analítica para la eficiencia en difracción. Los resultados de Kogelnik difieren en un factor $< 10\%$ con respecto a los obtenidos numéricamente por Burckhardt [44]. En un trabajo sin duda más conocido entre las teorías de redes de volumen [47], Kogelnik aplicó la teoría de ondas acopladas al caso de una red sinusoidal, asimétrica, de fase o de amplitud, de transmisión o de reflexión, derivando expresiones analíticas para las amplitudes de los dos órdenes de difracción principales (0 y -1). Dos estados de polarización de la onda incidente (TE y TM) se analizaron por separado. También se obtuvieron las fórmulas para la selectividad angular y espectral. La teoría de Kogelnik [47] es un típico ejemplo de una teoría de dos ondas y de primer orden.[(c)] Esta teoría sigue siendo actualmente extensivamente utilizada en holografía de volumen.[(d)]

Kiemle [49] estudió redes de reflexión absorbentes prediciendo una eficiencia máxima del 2.8 % en el caso de una incidencia normal, un valor considerablemente diferente al 7.2 % anticipado por Kogelnik [47]. Lin *et al.* [41] consiguieron experimentalmente sobrepasar el límite establecido por Kiemle obteniendo una eficiencia del 3.8 %.

En los años setenta apareció un gran número de trabajos sobre redes de volumen, orientados por un lado a la descripción de geometrías peculiares y por el otro al desarrollo de teorías rigurosas de una aplicabilidad general. Alferness y Case [50] introdujeron una técnica frecuentemente empleada posteriormente en las teorías rigurosas de ondas acopladas —descomposición de la red en una superposición de redes delgadas, caracterizables mediante funciones de transmitancia. Sin embargo, el análisis se limitaba a polarización TE. En la Ref. 51 Alferness estudió un caso de incidencia bajo segundo ángulo de Bragg. Case [52] extendió la teoría de ondas acopladas para un caso de dos redes de fase superpuestas utilizando doble exposición con ángulo de Bragg común, comparando las predicciones teóricas con los resultados experimentales obtenidos en gelatina dicromatada [53].

Chu y Tamir [54] analizaron la difracción de un haz gaussiano por una red de volumen, descomponiendo el campo incidente en el espectro angular de ondas planas. Los resultados teóricos difieren considerablemente de los derivados anteriormente para haces homogéneos. Se predice: *i*) una baja de la eficiencia en difracción con respecto a los resultados de los modelos derivados para haces homogéneos; *ii*) distorsión del haz difractado y *iii*) desdoblamiento del haz (un fenómeno análogo al efecto Pendellösung observado en difracción de rayos X por los cristales, véanse las Refs. 55–57). En la Ref. 58, Chu y Tamir extendieron la validez del modelo para una incidencia no estrictamente Bragg. En la Ref. 59 se generalizaron los modelos anteriores para la difracción de un haz de perfil arbitrario por una red sinusoidal de fase en incidencia normal. Se obtuvieron las amplitudes del orden n de difracción simplemente multiplicando la amplitud del espectro angular de la onda incidente por el coeficiente de transmisión o de reflexión correspondiente. Los resultados numéricos corresponden a las observaciones experimentales realizadas por Forshaw [60].

Los efectos dinámicos asociados con el proceso de registro del holograma, los cuales en general conducen a una red no homogénea, han sido, paradójicamente, poco estudiados. Kermisch [61] y Uchida [62] estudiaron la difracción por una red sinusoidal no uniforme. Ninomiya [63] y Magnusson y Gaylord [64] analizaron la influencia de la variación del espesor de la emulsión holográfica y del vector de la red en la eficiencia de difracción. Vahey [65] desarrolló una teoría de ondas acopladas no lineal para redes en materiales ferroeléctricos, considerando la influencia de los fenómenos dinámicos.

Parry y Solymar derivaron en 1977 la solución general para difracción de haces con amplitudes y fases arbitrarias por redes (en general) no homogéneas en dos dimensiones (2D), suponiendo polarización TE para el campo incidente [66]. Sin embargo, la solución [véase la Ref. 66, Ec. (24)] se ha obtenido a partir de una definición errónea de las condiciones de contorno [*ibid.*, Ecs. (16)–(22)]. Además el método sería de difícil implementación para geometrías de registro o de reconstrucción complejas, teniendo en cuenta su lenta convergencia. Solymar *et al.* en trabajos posteriores estudiaron los siguientes fenómenos: 1) influencia de las dimensiones finitas del haz o de la red en el proceso de difracción [67] (véase también Russell [68, 69]); 2) efecto de Bormann [70]; 3) variación del valor medio de la constante dieléctrica de la emulsión [71]; y 4) influencia de la intensidad relativa entre el haz objeto y el de referencia sobre la fidelidad de reconstrucción holográfica [72]. Los modelos teóricos [54–64] y [66–72] pertenecen al marco de teorías de dos ondas acopladas de primer orden. Sin embargo, se puede demostrar que la consideración de una variación lenta de las amplitudes no es justificable en algunas geometrías (por ejemplo para una incidencia rasante). Kong elaboró una teoría de modos acoplados de segundo orden [73], derivando soluciones analíticas para los coeficientes de reflexión y de transmisión, aplicables a un ángulo de incidencia arbitrario. Un resumen de las teorías de la difracción en redes volumétricas se puede encontrar también en Solymar y Cooke [74] y Eichler *et al.* [75].

Calvo *et al.* desarrollaron varios modelos aplicables a redes de volumen, basándose en la teoría de dispersión (ecuaciones integrales) [76–81] y en la teoría de ondas acopladas [82–85]. Álvarez-Estrada y Calvo [76] elaboraron una teoría rigurosa para la difracción de ondas electromagnéticas por redes delgadas, formulando las ecuaciones integrales (para el vector inducción **D**) y definiendo funciones de Green apropiadas. Se determinaron las condiciones para asegurar la convergencia de las soluciones obtenidas y se acotó el error introducido por la aproximación Debye-Born-Rayleigh-Gans. En la Ref. 77 Calvo extendió la teoría [76] para el caso de dispersión múltiple por defectos fijos de permeabilidad dieléctrica variable y conductividad nula. La teoría se aplicó al estudio teórico de difracción de rayos X por láminas cristalinas. Posteriormente se utilizó para el estudio de hologramas de volumen con una función de modulación del índice de refracción sinusoidal [78, 79]. Guibelalde y Calvo presentaron nuevas ecuaciones integrales [80] para el caso de transmisión y reflexión de ondas electromagnéticas por las redes de fase, dentro del formalismo escalar. El método se aplicó al estudio teórico de lentes holográficas y de fibras ópticas de perfil arbitrario. El modelo [80] se utilizó con éxito en el análisis de redes de transmisión en la transición entre los regímenes de Raman-Nath y de Bragg [81]. Dentro del marco de las teorías de ondas acopladas de dos ondas y de primer orden Guibelalde y Calvo analizaron la influencia del desplazamiento relativo entre las fases de una red de absorción y una red de fase, en el caso de redes holográficas de transmisión [82] y de reflexión [83]. En la Ref. 84 se presentó un modelo para la lente holográfica en eje basado en CWT. El método empleado es claro e instructivo, sin embargo las soluciones obtenidas para los dos órdenes de difracción no se presentan en forma normalizada y en algunos casos conducen virtualmente a eficiencias de difracción superiores al 100 %. En relación con elementos ópticos holográficos (EOH), Calvo y Pedraza [85] elaboraron un modelo matemático para la optimización de los sistemas acoplador holográfico-fibra óptica. Se obtuvo la solución para la condición óptima del doble acoplamiento (fibra óptica-EOH-fibra óptica) y se estudió numéricamente.

Las especulaciones sobre una posible aplicación de las redes de volumen para almacenamiento masivo de datos estimularon en los años setentas la investigación en redes multiplexadas. Kowarschik estudió redes de transmisión [86] y de reflexión [87], Baugh [88] y Case [52, 89] redes de transmisión. Wyant y Givens [90] y LaMacchia y Vincelette [91] compararon redes formadas simultáneamente (superposición coherente) con las formadas secuencialmente (superposición incoherente), prediciendo eficiencias de difracción superiores para la grabación simultánea que para la secuencial, en el caso de utilización de la misma energía de exposición total. Tsukada *et al.* [92] estudiaron la influencia del desplazamiento relativo entre las fases de las redes superpuestas. Burke y Sheng [93] analizaron el acoplamiento cruzado (*cross-talk*) entre dos redes de fase. Se estudiaron hologramas multiplexados en cristales ferroeléctricos ($LiNbO_3$, Woodbury *et al.* [94]), y en materiales orgánicos (Bartolini *et al.* [95]). Kazankova *et al.* [96] estudió detalladamente el efecto del limitado rango dinámico de fotoemulsiones al multiplexado de redes. Thaxter y Kestigan [97] y Yasuhira *et al.* [98] introdujeron el concepto de memorias ópticas holográficas de multicapas y Zel´dovich *et al.* [99, 100] demostraron teóricamente que una estructura compuesta por dos hologramas delgados (de fase) puede experimentar valores superiores en la eficiencia de difracción y en la selectividad espectral a los anticipados para el caso de un holograma simple. Johnson y Tanguay [101] generalizaron los conceptos introducidos por Thaxter y Kestigan y Zel´dovich *et al.*, mediante elementos ópticos holográficos estratificados de volumen (EOHEV), los cuales se definen como una sucesión de varios hologramas separados por capas homogéneas (véase también Nordin *et al.* [102]).

El desarrollo de la óptica integrada en los años ochenta y la implementación de las tecnologías originalmente desarrolladas para microelectrónica a la fabricación de dispositivos ópticos, estimuló nuevos trabajos sobre difracción en redes de volumen. El interés se centró en el desarrollo de técnicas rigurosas aplicables a un amplio espectro de dispositivos (redes en guías de onda, elementos ópticos holográficos, redes espectroscópicas, *Sub-Wavelength Structures* (SWS´s), óptica binaria . . .).

Las redes planares han sido extensamente analizadas por Magnusson, Gaylord, Glytsis y Moharam [103–108]. Magnusson y Gaylord [103] estudiaron (mediante una teoría de múltiples ondas acopladas) redes de amplitud o de fase, de perfil o de volumen para un ángulo de incidencia arbitrario, utilizando métodos numéricos (Runge-Kutta de orden cuatro). No se observaron inestabilidades numéricas. Moharam y Gaylord desarrollaron una "teoría rigurosa de ondas acopladas" [106] (RCWT: *rigorous coupled-wave theory*). Mediante un formalismo de variables de estado se llegó a una representación matricial de posible solución numérica. Los resultados numéricos se compararon con los de la "teoría modal rigurosa", "teoría modal de dos ondas" y "teoría de múltiples ondas acopladas de primer orden". Se demostró la necesidad de incluir en el análisis los órdenes superiores en el caso de redes de transmisión y las derivadas segundas del campo para redes de reflexión. En la Ref. 107 se analizó, empleando RCWT, la difracción por redes dieléctricas de perfil arbitrario, dividiendo la red en un número arbitrario de capas paralelas a la superficie del sustrato. Cada capa se describe mediante dos matrices de acoplamiento (una para TE y otra para TM polarización). Cada matriz viene asociada con dos condiciones de contorno (**E** o **H** tangenciales)$^{(e)}$. Una aplicación de RCWT para estructuras 3D en caso de difracción cónica$^{(f)}$ se puede encontrar en la Ref. 108.

El desarrollo de la óptica no lineal y de la óptica integrada estimuló la aplicación de RCWT a la difracción de luz por redes grabadas en materiales anisótropos ($LiNbO_3$, LBO, BBO, ADP, KDP ...). Glytsis y Gaylord [104] han introducido una anisotropía uniaxial a la RCWT [106]. Rokushima y Yamakita [112] desarrollaron una técnica basada en la RCWT para guías de ondas anisótropas. Serdyuk [113] estudió el efecto de la autodifracción en algunos cristales fotorrefractivos (tantalato de litio, niobato de litio, silicato de bismuto y titanato de germanio) y en algunos fotopolímeros (*Reoksan*$^{(g)}$). Aparte de la autodifracción se estudió también la relación entre la no homogeneidad de la red (resultado de la absorción durante la construcción del holograma) y algunos parámetros holográficos. Se predijo una bajada en la eficiencia de difracción y cambios en la selectividad espectral.

Aunque los medios no lineales no se encuentren como tal en el enfoque de este resumen, a continuación mencionamos algunos trabajos relevantes. Cronin-Golomb *et al.* [115] establecieron ecuaciones de acoplamiento para mezclado de cuatro ondas en cristales fotorrefractivos. Yeh [116] elaboró una teoría de acoplamiento en osciladores anulares unidireccionales y modelos para conjugación de fase por bombeo mutuo. Las propiedades anisotrópicas de algunos cristales fotorrefractivos han sido estudiados por Marrakchi *et al.* [117] para mezclado de dos ondas utilizando la aproximación colineal, y por Erdmann y Kowarschik [118] y Hall *et al.* [119] para mezclado de cuatro ondas. Pappen *et al.* [120] analizaron algunos efectos transitorios del proceso de conjugación de fase. Para una introducción a los fenómenos noli: les véase por ejemplo Boyd [121].

La difracción por re: es de volumen en incidencia rasante (aplicables, por ejemplo, como selectores espectrales en láseres sintonizables) fue estudiada por Vasnetsov *et al.* [122]. Se empleó la "teoría de ondas acopladas de segundo orden". Se demostró que incluso en el caso de redes de transmisión puede aparecer un intenso campo difractado hacia atrás. La red, originalmente de transmisión, se puede comportar en estos casos (incidencia rasante) como una red mixta (de transmisión y de reflexión).

La posible aplicación de los EOH en interconexiones ópticas [123–125] con el fin de sobrepasar las limitaciones de las conexiones eléctricas, originó varios trabajos sobre redes multiplexadas en materiales de volumen. Kostuk [126] obtuvo soluciones aproximadas para la eficiencia de una red holográfica de volumen formada por interferencia entre dos haces objeto y uno de referencia. Estudió dos posibilidades de registro: grabación secuencial y grabación simultánea. Comparó los resultados teóricos con los datos experimentales obtenidos en las placas holográficas Agfa-Gevaert 8E75HD. En el ya mencionado trabajo de Glytsis y Gaylord [104] se aplicó RCWT al análisis de varios tipos de redes anisótropas multiplexadas. Cuantitativamente se estimó el valor del acoplamiento cruzado y el efecto de la diferencia entre las fases de las redes. Moharam [127] analizó el acoplamiento directo e indirecto en redes multiplexadas variando la dirección del haz de referencia. Estudió la influencia: *i*) de la separación angular entre los haces de referencia; *ii*) del espesor del medio y *iii*) de la polarización de la luz, en la eficiencia de difracción y en el acoplamiento cruzado directo e indirecto. Psaltis *et al.* [128], estudiando la posibilidad de implementación de hologramas en las redes neuronales artificiales, introdujeron el concepto del multiplexado fractal (los haces de referencia no tienen plano de incidencia común). Lee [129] analizó el acoplamiento cruzado en hologramas de Fourier multiplexados y obtuvo una fórmula para la relación señal/ruido durante la reconstrucción del holograma. Estudió la importancia del acoplamiento cruzado de varios órdenes$^{(h)}$. Con el fin de estudiar la difracción por redes multiplexadas, Tu *et al.* elaboraron una teoría de dispersión múltiple [130], aplicando la aproximación de Born de orden superior, partiendo de los conceptos introducidos por Fujiwara [7] (difracción elástica de electrones por cristales) y por Korpel *et al.* [131–133] (difracción de haces ópticos por redes acústicas no homogéneas). Tu *et al.* en la Ref. 134 emplearon este formalismo para la evaluación del acoplamiento cruzado en interconexiones holográficas. Se evaluó la influencia de varios parámetros (rango dinámico del medio holográfico, separación espacial mínima entre dos canales, tamaño del holograma) sobre el comportamiento del interconector óptico.

2. Desarrollos recientes: período 1994–1997

A continuación se presentarán algunas contribuciones relevantes al campo de nuestro enfoque durante el período 1994–1997. Los modelos teóricos se discutirán en los siguientes grupos:

- teorías de ondas acopladas y teorías modales,
- teorías electromagnéticas de redes,
- teorías de dispersión múltiple,
- otras teorías.

2.1. Teorías de ondas acopladas y teorías modales

Sipe *et al.* [135] analizaron la propagación de haces en redes no uniformes y aperiódicas con una perturbación débil. Empleando el concepto del "medio efectivo" se obtuvieron soluciones aproximadas mediante análisis WKB. Esta teoría es especialmente conveniente para análisis de redes de Bragg en núcleos de fibras ópticas [136]. Chateau y Huganin [137] propusieron un algoritmo numéricamente estable para la solución de la matriz característica del medio, particularmente apropiado para simulación de redes no uniformes. La estabilidad se obtuvo a base de un tratamiento separado para dos tipos de modos no homogéneos existentes en el medio (los crecientes y los decrecientes). Sasaki *et al.* [138] estudiaron la dinámica de dos redes multiplexadas en un medio fotorrefractivo suponiendo un desplazamiento arbitrario entre las fases de las dos redes e incluyendo la influencia del campo eléctrico externo. Los resultados teóricos se compararon con los obtenidos experimentalmente en un cristal SBN dopado con Ce. Noponen y Turunen [139] extendieron la "teoría rigurosa de modos acoplados" [140, 141] para un caso de síntesis de estructuras binarias resonantes 3D. Mediante la técnica de optimización no lineal paramétrica se obtuvieron soluciones para eficiencias en difracción de dispositivos binarios, incluyendo varias formas de perfiles binarios (circular, rectangular y trapezoidal). Se estudió la influencia de las tolerancias de fa bricación al dispositivo en cuestión. Moharam *et al.* presentaron en la Ref. 142 un algoritmo estable y eficiente, implementable en RCWT con el fin de estudiar redes binarias de una dimensión. Se analizaron casos de polarización TE, TM y de difracción cónica. Se demostró que en los casos de: 1) redes de períodos largos; 2) redes profundas; 3) polarización TM y 4) difracción cónica, es imprescindible incluir en el análisis un número mayor de armónicos espaciales con el fin de asegurar una buena convergencia de las soluciones. En la Ref. 143 se presentó un modelo especialmente conveniente para redes muy profundas, estructuras de multinivel y redes binarias asimétricas. Además se propuso una formulación eficiente y estable para geometrías estrictamente de reflexión o de transmisión (no mixtas). Se obtuvieron resultados convergentes para redes excesivamente profundas ($\approx 50\lambda$) y para estructuras de hasta 16 niveles. De Vré y Hesselink [144, 145] analizaron algunas propiedades de los elementos ópticos holográficos estratificados de volumen (EOHEV), grabados en los materiales fotorrefractivos. En la Ref. 145 se obtuvieron las soluciones analíticas para las amplitudes de los órdenes difractados y se propuso una novedosa aplicación de los EOHEV: un filtro multiespectral sintonizable. Jarem y Banerjee [146] en el marco de la RCWT analizaron la mezcla entre ondas múltiples en titanato de bario. En base a las ecuaciones de Kukhtarev [147] se determinaron analíticamente los siguientes parámetros: amplitudes del campo reflejado y transmitido, modulación de la permitividad dieléctrica y distribución del campo electrostático y de la densidad de la carga espacial libre. Lalanne y Morris [148] reformularon el problema de los valores propios de la RCWT de Moharam y Gaylord [106], mejorando así la convergencia de la teoría [106] en el caso de la pola rización TM. Okamura y Kuroda [149] elaboraron un método de medición de la distribución espacial (3D) de una red de volumen, en base a la solución inversa de las ecuaciones acopladas. El método es aplicable para las redes de fase y de amplitud. Cheben y Calvo [150–152] estudiaron la conversión entre un haz gausiano con fase cilíndrica y una onda plana por una red de volumen aperiódica, inhomogénea y aplanar, dentro del formalismo de la teoría de (dos) ondas acopladas de primer orden. Se han estudiado dos tipos de desviaciones de régimen de Bragg estricto (cromáticas y geométricas). Los resultados numéricos indican la existencia de los siguientes fenómenos anómalos: efecto Pendellösung (véanse también [153] y [154]), fenómeno de amplificación angular y acromatismo. Los dos primeros han sido anteriormente teóricamente anticipados y experimentalmente comprobados para el caso de difración de neutrones por cristales (véanse Refs. 155 y 156).

Para las contribuciones más recientes a las teorías de ondas acopladas y a las teorías modales véanse Refs. 157–164 y 165–171, respectivamente.

2.2. Teorías de dispersión múltiple

Las "teorías de dispersión múltiple" se siguen empleando preferentemente en estudio de redes acusto-ópticas. Chatterjee y Chen [172] analizaron la difracción por dos células ultrasónicas paralelas en diferentes regímenes de funcionamiento (una en régimen de Bragg, otra en régimen de Raman-Nath). Se estudió la posible aplicación del dispositivo para detección y análisis de ondas acústicas superficiales (SAW´s: *Surface Acoustic Waves*). Chen y Korpel [173] estudiaron la difracción de luz por una onda acústica aplanar (cilíndrica). Se supuso una interacción múltiple entre la luz y la onda acústica y se empleó la versión en aproximación eikonal del método de diagramas de Feynman$^{(i)}$. Los resultados teóricos se comparan con las simulaciones basadas en el algoritmo de propagación de haz (*Beam Propagation Algorithm*) [175].

Para las contribuciones más recientes a las teorías de dispersión múltiple véanse las Refs. 176–179.

2.3. Teorías electromagnéticas de redes

Los modelos teóricos basados en la forma diferencial de la "teoría electromagnética de redes", desarrollada por Petit, Maystre, Nevière y Vincent [180], no se han incluido en el presente resumen histórico, dado que fueron elaborados inicialmente para redes de perfil. Sin embargo, Nevière [181] recientemente presentó una teoría diferencial para análisis de redes Bragg-Fresnel$^{(j)}$. Se demostró que aplicando el formalismo de matriz T para este tipo de dispositivos se puede llegar a soluciones rápidamente convergentes en el caso de polarización TE. En la Ref. 185 Montiel y Nevière extendieron la teoría diferencial para redes de perfil (profundo) y permitividad arbitrarios empleando el algoritmo de propagación de matriz R (*R-Matrix Propagation Algorithm*)$^{(k)}$. Mediante este método se consiguió eliminar las inestabilidades numéricas que generalmente estaban asociadas con el uso de la matriz T en polarización TM (véase, por ejemplo, la Ref. 181). El método es aplicable también a redes superpuestas. Nevière *et al.* [190] estudiaron los polos y los ceros del operador de dispersión (matriz S) con el fin de interpretar algunas anomalías resonantes observadas en redes metálicas y dieléctricas. Montiel y Nevière [191] elaboraron una teoría electromagnética aplicable para las placas zonales de tipo Bragg-Fresnel. Un enfoque especial se dedicó al fenómeno de la amplificación del campo en la zona próxima a la superficie de la red[(l)]. Morf [193] analizó redes laminares obteniendo soluciones exponencialmente convergentes. Desarrolló el campo electromagnético en funciones propias de la ecuación de Helmholtz, las cuales expresó en forma de polinomios ortogonales (Chebishev y Legendre). El método parece rápidamente convergente y numéricamente estable incluso para fuertes resonancias [véase la Ref. 193, Ec. (60)].

Las contribuciones más recientes a la teoría electromagnética se pueden encontrar en las Refs. 194–201.

2.4. Otras teorías

Sheridan [202] desarrolló una formulación analítica para la difracción por redes de volumen utilizando el "método de difracción por el contorno" (BDM: *boundary diffraction method*) dentro del marco de las teorías de primer orden[(m)]. Se caracterizó la dispersión múltiple por una red de Bragg mediante coeficientes escalares de dispersión por la superficie de la red empleando una teoría geométrica de difracción [206]. En el tratamiento analítico se han considerado tres ondas de propagación inversa y tres de propagación directa. El método puede ser de especial interés para simulación de dispositivos donde se requiere un riguroso control de los órdenes espúreos (por ejemplo HUD´s: *head-up displays*, véase Ref. 207).

Campbell y Kostuk [208] obtuvieron soluciones analíticas para redes de volumen holográficas con una modulación sinusoidal del índice de refracción, utilizando la llamada "teoría del medio efectivo" (EMT—*effective medium theory*)[(n)]. Se demostró que para los hologramas en cuestión se puede emplear como modelo una lámina uniaxial negativa en el caso de un período de la red Λ pequeño en comparación con la longitud de onda λ del haz incidente[(o)]. Los resultados se compararon con los obtenidos mediante RCWT. Se demuestra que el límite de validez $\lambda_{\min}$ de la aproximación quasi estática es más restringido para redes inclinadas o para una incidencia cónica, que para los casos contrarios.

Golias *et al.* [211] analizaron redes metálicas de perfil arbitrario mediante el método de elementos finitos. Estrictamente hablando, el método se empleó sólo en la representación del campo en la región interior de la red. En la región exterior se utilizó el desarrollo en armónicos espaciales definidos en el teorema de Floquet. Las soluciones de Floquet se emplearon como condiciones de contorno para las soluciones obtenidas mediante el método de elementos finitos. El principal interés del método consiste en la reducción del número de armónicos de Floquet imprescindibles para una buena convergencia de las soluciones.

Los llamados "algoritmos microgenéticos"[(p)] fueron introducidos en el diseño de redes dieléctricas por Johnson [214]. Se demostró una buena eficiencia del método para diseño de 1) redes *fan-out*; 2) estructuras antireflectantes; 3) estructuras resonantes y 4) redes en cascada. La estructura intrínsecamente paralela así como el tamaño restringido de población (≤ 5) hacen estos algoritmos especialmente interesantes desde el punto de vista computacional.

En relación con algunos fenómenos asociados con los medios fotorrefractivos véanse por ejemplo Christodoulides y Carvalho [215] y Sturman *et al.* [216]. Para las contribuciones más recientes véanse Refs. 217–225.

Agradecimientos

Este trabajo está basado en la tesis doctoral presentada en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid por Pavel Cheben. Se agradece la ayuda de la Universidad Complutense de Madrid y del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) facilitada dentro del vigente acuerdo marco entre las dos Instituciones, y también la ayuda del National Research Council, Canada, durante la finalización del presente trabajo. Agradecemos al Prof. A. Fimia por la sugerencia de elaborar esta revisión y al árbitro por sus interesantes comentarios.

(a). Q es el parámetro frecuentemente utilizado para especificar el régimen de funcionamiento de la red. Para el régimen de Bragg: $Q >> 1$; para el de Raman-Nath: $Q < 1$. En el caso de una red de volumen unidimensional en incidencia normal se puede demostrar que $Q = |\mathbf{K}|^2 T/\beta$, donde $\mathbf{K}$ es el vector de la red, β es la constante de propagación de la onda incidente, T es el espesor (geométrico) de la red.

(b). Trabajando con hologramas de reflexión Denisyuk inicialmente intentaba (sin éxito) obtener emulsiones con espesores $< \lambda/2 \approx 300$ nm para obtener un holograma de superficie, sin darse cuenta de la posibilidad de aprovechar el efecto de Bragg. En un resumen autobiográfico [31] Denisyuk dice: "... consideraba esta dificultad como insalvable y estuve cerca de dejar de trabajar en esta dirección." Recordamos que Lippmann [32, 33] en los años 90 del siglo pasado aprovechó la selectividad espectral de una red de volumen para fabricación de fotografías en color (algunas de ellas todavía existen y se pueden ver en el Museo de Ciencia en Londres.)

(c). Se supone: 1) Existencia de únicamente dos ondas en el medio modulado, y 2) una lenta variación espacial de la amplitud del campo. A las teorías de ondas acopladas que emplean estas dos aproximaciones se las denomina teorías de dos ondas y de primer orden.

(d). Es sorprendente que el programa de diseño óptico CODE V sigue actualmente empleando la teoría de Kogelnik [47] para simulación de elementos ópticos holográficos. Véase Ref. 48.

(e). La técnica de descomposición de una red de perfil en (dos) capas fue empleada por primera vez por Peng *et al.* en 1975 [109].

(f). En el caso de la difracción cónica, el vector de la red no se encuentra necesariamente en el plano de incidencia. Los vectores de onda del campo difractado forman un cono cuyo eje es paralelo a las franjas de la red. Las componentes TE y TM del campo están mutuamente acopladas en el interior de la red. No existen soluciones independientes para polarización TE y TM. El primer tratamiento de la difracción cónica fue presentado en 1980 por Maystre [110]. Chuang y Kong [111] generalizaron la solución de Maystre mediante funciones de Green.

(g). Para un resumen exhaustivo de los materiales holográficos desarrollados en la Unión Soviética véase la Ref. 114.

(h). Se define que entre los haces A y B hay acoplamiento cruzado de orden n si hay un acoplamiento entre estos dos haces mediante n interacciones (por difracción) con la red.

(i). Véase también la Ref. 174, donde se analiza la difracción de luz por una red acusto-óptica aplanar suponiendo una simple interacción entre la luz y la onda acústica.

(j). La óptica Bragg-Fresnel, introducida por Aristov *et al.* [182] (véase también Babin y Erko [183]), está basada en la fabricación de redes de perfil en sustratos planos de multicapas. Es particularmente interesante en enfoque, creación de imágenes y espectroscopía de rayos X. Dado que una red Bragg-Fresnel es una "fusión" de una red de volumen con una red de perfil, se pueden obtener altas eficiencias de difracción mediante los efectos de Bragg y de *blazing* (referente al *blazing*, véase por ejemplo la Ref. 184) incluso para aquellas frecuencias del espectro electromagnético donde anteriormente la única solución era emplear una óptica de incidencia rasante.

(k). El algoritmo de propagación de matriz R se desarrolló en 1976 con el fin de estudiar reacciones químicas [186, 187]. Fue introducido sólo recientemente a teorías de redes por DeSandre y Elson [188] y por Li [189].

(l). El fenómeno de amplificación del campo es de interés en óptica lineal (microscopio de campo próximo), pero sobre todo en óptica no lineal (dispersión Raman, generación de segundo armónico, luminiscencia, efecto Kerr, biestabilidad óptica ...). El efecto fue descubierto por Popov y Tsonev [192] en 1989.

(m). Véanse también anteriores trabajos de Sheridan y Solymar sobre BDM [203–205].

(n). Para conceptos básicos sobre EMT véase Born y Wolf [209]. La teoría fue introducida en el análisis de redes por McPhedran *et al.* en 1982 [210].

(o). Si $\Lambda \ll \lambda$, todos los órdenes de difracción excepto del órden cero serán evanescentes. A este tipo de red se le suele denominar red de orden cero o red de ultraalta frecuencia espacial. Redes de alta frecuencia espacial (5.000–10.000 líneas/mm) son técnicamente más fácilmente realizables en forma de volumen que en forma de relieve.

(p). Los algoritmos microgenéticos fueron desarrollados por Goldberg [212] y Krishnakumar [213] en 1988–1989.

1. P.P. Ewald, *Ann. Phys.* **49** (1916) 1.
2. P.P. Ewald, *Ann. Phys.* **49** (1916) 117.
3. P.P. Ewald, *Ann. Phys.* **54** (1917) 519.
4. P.P. Ewald, *Z. Kristallogr.* **56** (1921) 129.
5. M. von Laue, *Ergebnisse der exacten Naturwissenschaften* **10** (1931) 133.
6. H. Bethe, *Ann. Phys.* **87** (1928) 55.
7. K. Fujiwara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **14** (1956) 1513.
8. B.W. Batterman and H. Cole, *Rev. Mod. Phys.* **36** (1964) 681.
9. W.H. Zachariasen, *Theory of X-ray diffraction in crystals*, (Wiley, New York, 1945).
10. R.W. James, en *The crystalline state* 2, edited by L. Bragg, (Bell, London, 1948).
11. L.V. Azároff *et al.*, *X-ray diffraction*, (McGraw-Hill, New York, 1974).
12. Z.G. Pinsker, *Dynamical scattering of X-rays in crystals*, (Springer-Verlag, Berlin, 1978).
13. L. Brillouin, *Ann. Phys. (Leipzig)* **17** (1921) 88.
14. R. Lucas and P. Biquard, *J. Phys. (Paris)* **71** (1932) 464.
15. P. Debye and F.W. Sears, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **18** (1932) 409.
16. L. Brillouin, *Actualités Scientifiques et Industrielles* **59** (1933) 1.
17. C.V. Raman and N.S.N. Nath, *Proc. Ind. Acad. Sci. U.S.A.* **2** (1935) 406.
18. C.V. Raman and N.S.N. Nath, *Proc. Ind. Acad. Sci. U.S.A.* **2** (1935) 413.
19. C.V. Raman and N.S.N. Nath, *Proc. Ind. Acad. Sci. U.S.A.* **3** (1936) 75.
20. C.V. Raman and N.S.N. Nath, *Proc. Ind. Acad. Sci. U.S.A.* **3** (1936) 119.
21. C.V. Raman and N.S.N. Nath, *Proc. Ind. Acad. Sci. U.S.A.* **3** (1936) 459.
22. R. Extermann and C. Wannier, *Helv. Phys. Acta* **9** (1936) 520.
23. R.R. Aggrawal, *Proc. Ind. Acad. Sci. U.S.A.* **31** (1950) 417.
24. R. Mertens, *Mededelingen Koninklijke Vlaamse Academie Wetenschappen* **12** (1950) 1.
25. R. Mertens, *Simon Stevin* **27** (1959) 212.
26. P. Phariseau, *Simon Stevin* **33** (1959) 72.
27. P. Phariseau, *Proc. Ind. Acad. Sci. A U.S.A.* **44** (1956) 165.
28. E. David, *Phys. Z* **38** (1937) 587.
29. W.R. Klein and B.D. Cook, *IEEE Trans. Sonic Ultrason.* **SU14** (1967) 123.
30. Yu. N. Denisyuk, *Sov. Phys.–Dokl.* **7** (1962) 543.
31. Yu. N. Denisyuk, *J. Int. Soc. Art. Sci. Tech.* **25** (1992) 425.
32. M.G. Lippmann, *C.R. Acad. Sci.* **112** (1891) 274.
33. M.G. Lippmann, *J. Phys. (Paris)* **3** (1894) 97.
34. P.J. van Heerden, *Appl. Opt.* **2** (1963) 393.
35. F.M. Smits and L.E. Gallaher, *Bell Sys. Tech. J.* **46** (1967) 1267.
36. V.A. Vitols, *IBM Tech. Discl. Bull.* **8** (1966) 1581.

37. K.S. Pennington and L.H. Lin, *Appl. Phys. Lett.* **7** (1965) 56.

38. G.W. Stroke and A.E. Labeyrie, *Phys. Lett.* **20** (1966) 368.

39. L.H. Lin, K.S. Pennington, G.W. Stroke, and A.E. Labeyrie, *Bell Sys. Tech. J.* **45** (1966) 659.

40. J. Upatnieks, J. Marks, and R. Fedorwicz, *Appl. Phys. Lett.* **8** (1966) 286.

41. L.H. Lin and C.V. Bianco, *Appl. Opt.* **6** (1967) 1255.

42. E.N. Leith *et al.*, *Appl. Opt.* **5** (1966) 1303.

43. D. Gabor and G.W. Stroke, *Proc. R. Soc. London No. 1478* **304** (1968) 275.

44. C.W. Burckhardt, *J. Opt. Soc. Am.* **56** (1966) 1502.

45. E.J. Saccocio, *J. Appl. Phys.* **38** (1967) 3994.

46. H. Kogelnik, *J. Opt. Soc. Am.* **57** 1967) 431.

47. H. Kogelnik, *Bell Sys. Tech. J.* **48** (1969) 2909.

48. *Advanced topics in CODE V*, Optical Research Associates seminar, 13–24, September, 1993, Pasadena, California.

49. H. Kiemle, *Frequenz* **22** (1968) 206.

50. R.C. Alferness and S.K. Case, *J. Opt. Soc. Am.* **65** (1975) 730.

51. R. Alferness, *J. Opt. Soc. Am.* **66** (1976) 353.

52. S.K. Case, *J. Opt. Soc. Am.* **65** (1975) 724.

53. R. Alferness and S.K. Case, *J. Opt. Soc. Am.* **65** (1975) 730.

54. R.-S. Chu, T. Tamir, *J. Opt. Soc. Am.* **66** (1976) 220.

55. C.G. Shull, *Phys. Rev. Lett.* **21** (1968) 1585.

56. C.G. Shull, *J. Appl. Cryst.* **6** (1973) 257.

57. P. Cheben and M.L. Calvo, in *Proceedings of 6th Topical Meeting of the EOS*, EOS Top. Meetings Digests Series **6** (1995) 411.

58. R.-S. Chu and T. Tamir, *J. Opt. Soc. Am.* **66** (1976) 1438.

59. R.-S. Chu and J.A. Kong, *J. Opt. Soc. Am.* **70** (1980) 1.

60. M.R.B. Forshaw, *Opt. Comm.* **12** (1974) 279.

61. D. Kermisch, *J. Opt. Soc. Am.* **59** (1969) 1409.

62. N. Uchida, *J. Opt. Soc. Am.* **63** (1973) 280.

63. Y. Ninomiya, *J. Opt. Soc. Am.* **63** (1973) 1124.

64. R. Magnusson and T.K. Gaylord, *J. Appl. Phys.* **47** (1976) 190.

65. D.W. Vahey, *J. Appl. Phys.* **46** (1975) 3510.

66. W.E. Parry and L. Solymar, *Opt. Quant. Electr.* **9** (1977) 527.

67. M.P. Jordan and L. Solymar, *Opt. Quant. Electr.* **10** (1978) 503.

68. P.St. Russell, *J. Opt. Soc. Am.* **69** (1979) 496.

69. P.St. Russell, *Opt. Acta* **27** (1980) 997.

70. P.St. Russell, L. Solymar, and M.P. Jordan, *ICO-11*, (Madrid, 1978), p. 520.

71. L. Solymar, *Opt. Comm.* **26** (1978) 158.

72. B. Benlarbi and L. Solymar, *Opt. Acta* **26** (1979) 271.

73. J.A. Kong, *J. Opt. Soc. Am.* **67** (1977) 825.

74. L. Solymar and D.J. Cooke, *Volume holography and volume gratings*, (Academic Press, London, 1981).

75. H.J. Eichler, P. Guenter, and D.W. Pohl, *Laser induced dynamic gratings*, (Springer-Verlag, Berlin, 1986).

76. R.F. Álvarez-Estrada and M.L. Calvo, *J. Phys. A: Math. Gen.* **11** (1978) 1855.

77. M.L. Calvo, Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, Fac. de Ciencias Físicas, Madrid (1977).

78. M.L. Calvo and P. Juncos del Egido, *ICO-11*(Madrid, 1978), p. 627.

79. M.L. Calvo and P. Juncos del Egido, *Opt. Acta* **29** (1982) 1061.

80. E. Guibelalde, M.L. Calvo, *Opt. Eng.* **26** (1987) 499.

81. E. Guibelalde and M.L. Calvo, *Opt. Laser Technol.* **20** (1988) 156.

82. E. Guibelalde, *Opt. Quant. Electr.* **16** (1984) 173.

83. E. Guibelalde and M.L. Calvo, *Opt. Quant. Electr.* **18** (1986) 213.

84. E. Guibelalde and M.L. Calvo, *Opt. Comm.* **59** (1986) 331.

85. M.L. Calvo and L. de Pedraza, *Appl. Opt.* **28** (1989) 2031.

86. R. Kowarschik, *Opt. Acta* **25** (1978) 67.

87. R. Kowarschik, *Opt. Quant. Electr.* **10** (1978) 171.

88. R.A. Baugh, Ph.D. Thesis, Stanford Univ., university microfilm 70-10-422, Stanford (1969).

89. S.K. Case, Ph.D. Thesis, Michigan Univ., university microfilm 76-27-461, Ann Arbor (1976).

90. J.C. Wyant and M.P. Givens, *J. Opt. Soc. Am.* **59** (1969) 1650.

91. J.T. LaMacchia and C.J. Vincelette, *Appl. Opt.* **7** (1968) 1857.

92. N. Tsukada, R. Tsujinishi, and K. Tomishima, *J. Opt. Soc. Am.* **69** (1979) 705.

93. W.J. Burke and P. Sheng, *J. Appl. Phys.* **48** (1977) 681.

94. D.A. Woodbury, F.A. Tittel, and T.A. Rabson, *Appl. Opt.* **18** (1979) 2555.

95. R.A. Bartolini, A. Bloom, and J.S. Escher, *Appl. Phys. Lett.* **28** (1976) 506.

96. V.V. Kazankova, V.I. Protasevich, and Y.A. Pryakhin, *Opt. Spectrosc.* **44** (1978) 324.

97. J.B. Thaxter and M. Kestigan, *Appl. Opt.* **13** (1974) 913.

98. T. Yasuhira *et al.*, *Appl. Opt.* **16** (1977) 2532.

99. B.Ya. Zel´dovich and T.V. Yakovleva, *Sov. J. Quantum Electron.* **14** (1984) 323.

100. B.Ya. Zel´dovich, D.I. Mirovitskii, N.V. Rostovtseva, and O. B. Serov, *Sov. J. Quantum Eletron.* **14** (1984) 364.

101. R.V. Johnson and A.R. Tanguay, *Opt. Lett.* **13** (1988) 189.

102. G.P. Nordin, R.V. Johnson, and A.R. Tanguay, *J. Opt. Soc. Am.* **9** (1992) 2206.

103. R. Magnusson and T.K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am.* **67** (1977) 1165.

104. E.N. Glytsis and T.K. Gaylord, *Appl. Opt.* **28** (1989) 2401.

105. R. Magnusson and T.K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am.* **68** (1978) 806.

106. M.G. Moharam and T.K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am.* **71** (1981) 811.

107. M.G. Moharam and T.K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am.* **72** (1982) 1385.
108. M.G. Moharam and T.K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am.* **73** (1983) 1105.
109. S.T. Peng, H.L. Bertoni, and T. Tamir, *Opt. Comm.* **10** (1974) 91.
110. D. Maystre, en *Electromagnetic theory of gratings*, edited by R. Petit, (Springer-Verlag, Berlin, 1980).
111. S.L. Chuang and J.A. Kong, *Radio Sci.* **17** (1982) 545.
112. K. Rokushima and J. Yamakita, *J. Opt. Soc. Am.* **73** (1983) 901.
113. V.M. Serdyuk, *Sov. Phys. Tech. Phys.* **34** (1989) 1097.
114. V.T. Gvozdovski, V.M. Kozenko, V.A. Barachevskii, and S.I. Perederceva, *Nuevos materiales para registro holográfico* [en Ruso], (Nauka, Leningrad,1983).
115. M. Cronin-Golomb, B. Fischer, J.O. White, and A. Yariv, *IEEE J. Quant. Electr.* **QE-20** (1984) 12.
116. P. Yeh, *IEEE J. Quant. Electr.* **QE-25** (1989) 484.
117. A. Marakchi, R.V. Johnson, and A.R. Tanguay, *J. Opt. Soc. Am. B* **3** (1986) 321.
118. A. Erdmann and R. Kowarschik, *IEEE J. Quant. Electr.* **QE-24** (1988) 155.
119. T.J. Hall, A.K. Powell, and C. Stace, *Opt. Comm.* **75** (1990) 159.
120. G. Pappen, B.E.A. Saleh, and J.A. Tataronis, *J. Opt. Soc. Am.* **5** (1988) 1763.
121. R.W. Boyd, *Nonlinear optics*, (Academic Press, San Diego, 1992).
122. M.V. Vasnetsov, M.S. Soskin, and V.B. Taranenko, *Bull. Acad. Sci. USSR, Phys. Ser.* **44** (1980) 108.
123. J.W. Goodman, F.J. Loenberger, S.Y. Kung, and R.A. Athale, *Proc. IEEE* **72** (1984) 850.
124. R.K. Kostuk, J.W. Goodman, and L. Hesselink, *Appl. Opt.* **24** (1985) 2851.
125. Ch. Tocci and H.J. Caulfield, editors, *Optical interconnection, foundations and applications*, (Artech House, Inc., Norwood, 1994).
126. R.K. Kostuk, J.W. Goodman, and L. Hesselink, *Appl. Opt.* **25** (1986) 4362.
127. M.G. Moharam, en *Practical Holography III, SPIE* **1051** (1989) 143.
128. D. Psaltis, D. Brady, X. Gu, and S. Lin, *Nature* **343** (1990) 325.
129. H. Lee, *Opt. Lett.* **13** (1988) 874.
130. K.-Y. Tu, T. Tamir, and H. Lee, *J. Opt. Soc. Am. A* **7** (1990) 1421.
131. A. Korpel, *J. Opt. Soc. Am.* **69** (1979) 678.
132. A. Korpel and T.-Ch. Poon, *J. Opt. Soc. Am.* **70** (1980) 817.
133. T.-Ch. Poon and A. Korpel, *J. Opt. Soc. Am.* **71** (1981) 1202.
134. K.-Y. Tu, H. Lee, and T. Tamir, *Appl. Opt.* **31** (1992) 1717.
135. J.E. Sipe, L. Poladian, and C.M. de Sterke, *J. Opt. Soc. Am. A* **11** (1994) 1307.
136. K.O. Hill *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **62** (1993) 1035.
137. N. Chateau and J.P. Huganin, *J. Opt. Soc., Am. A* **11** (1994) 1321.
138. H. Sasaki *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. A* **11** (1994) 2456.
139. E. Noponen and J. Turunen, *J. Opt. Soc. Am. A* **11** (1994) 2494.
140. S.T. Peng, T. Tamir, and H.L. Bertoni, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **MTT-23** (1975) 123.
141. K. Knop, *J. Opt. Soc. Am.* **68** (1978) 1206.
142. M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet, and T.K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 1068.
143. M.G. Moharam, D.A. Pommet, E.B. Grann, and T.K. Gaylord, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 1077.
144. R. De Vré and L. Hesselink, *J. Opt. Soc. Am. B* **11** (1994) 1800.
145. R. De Vré and L. Hesselink, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 285.
146. J.M. Jarem and P.P. Banerjee, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 819.
147. N. V. Kukhtarev *et al.*, *Ferroelectrics* **22** (1979) 949.
148. P. Lalanne and G.M. Morris, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 779.
149. H. Okamura and K. Kuroda, *Appl. Phys. B* **62** (1996) 399.
150. P. Cheben and M.L. Calvo, *J. Opt. Soc. Am. A* **10** (1993) 2573.
151. P. Cheben and M.L. Calvo, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 131.
152. P. Cheben, Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid (1996).
153. P. Cheben and M.L. Calvo, en *Diffractive Optics*, OSA Tech. Digest Series **11** (1994) 179.
154. P. Cheben and M.L. Calvo, en *Proc. 6th Topical Meeting of the EOS*, EOS Top. Meetings Digests Series **6** (1995) 411.
155. C.G. Shull, *Phys. Rev. Lett.* **21** (1968) 1585.
156. S. Kikuta, J. Ishikawa, K. Kohra, and S. Hoshino, *J. Phys. Soc. Jpn.* **39** (1975) 471.
157. E.B. Grann and M.G. Moharam, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 988.
158. S. Peng and G.M. Morris, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (????) 993.
159. G. Granet and B. Guizal, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1019.
160. L. Li, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1024.
161. R. De Vré, J.F. Heanue, K. Grkan, and L. Hesselink, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1331.
162. C. Gu, J.-R. Lien, F. Dai, and J. Hong, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1704.
163. Ch.-W. Han and R.K. Kostuk, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1728.
164. V.B. Voloshinov *et al.*, *Opt. Spectr.* **82** (1996) 764.
165. T. Ergodan and J. E. Sipe, *J. Opt. Soc. A* **13** (1996) 296.
166. S. Zhang and T. Tamir, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2403.
167. Y. Zhao and J.C. Palais, *J. Lightwave Tech.* **15** (1997) 154.
168. W. Gabathuler and W. Lukosz, *Opt. Comm.* **135** (1997) 385.

169. K. Krastev, J. M. André, and R. Barchewitz, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2027.

170. E.Ya. Glushko, *Opt. Spectr.* **82** (1997) 331.

171. S. M. Norton, T. Erdogan, and G. M. Morris, *J. Opt. Soc. Am. A* **14** (1997) 629.

172. M.R. Chatterjee and S.-T. Chen, *J. Opt. Soc. Am. A* **11** (1994) 637.

173. Y.-M. Chen and A. Korpel, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 541.

174. R. Pieper and A. Korpel, *J. Opt. Soc. Am. A* **2** (1985) 1435.

175. C. Venzke, A. Korpel, and D. Mehrl, *Appl. Opt.* **31** (1992) 656.

176. R.D. Kubik and E. Bahar, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2050.

177. R.D. Kubik and E. Bahar, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2060.

178. D. Pureur *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. A* **14** (1997) 417.

179. G. Guida, D. Maystre, and G. Tayeb, *J. Opt. Soc. Am. A* **14** (1997) 430.

180. P. Vincent, en *Electromagnetic theory of gratings*, edited by R. Petit, (Springer-Verlag, Berlin, 1980).

181. M. Nevière, *J. Opt. Soc. Am. A* **11** (1994) .

182. V.V. Aristov, A.I. Erko, and V.V. Martinov, *Rev. Phys. Appl.* **23** (1988) 1623.

183. S. Babin and A. Erko, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **282** (1989) 529.

184. M.C. Hutley, *Diffraction gratings*, (Academic Press, London, 1982), p. 36.

185. F. Montiel and M. Nevière, *J. Opt. Soc. Am. A* **11** (1994) 3241.

186. D.J. Zvijac and J.C. Light, *Chem. Phys.* **12** (1976) 237.

187. J.C. Light and R.B. Walker, *J. Chem. Phys.* **65** (1976) 4272.

188. L.F. DeSandre and J.M. Elson, *J. Opt. Soc. Am. A* **8** (1991) 763.

189. L. Li, *J. Opt. Soc. Am. A* **10** (1993) 2581.

190. M. Nevière, E. Popov, and R. Reinich, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 513.

191. F. Montiel and M. Nevière, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 2672.

192. E. Popov and L. Tsonev, *Opt. Commun.* **69** (1989) 193.

193. R.H. Morf, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 1043.

194. M. Nevière and F. Montiel, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 811.

195. F. Montiel and M. Nevière, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1429.

196. W.A. Challener, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1859.

197. J.B. Harris *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2041.

198. L. Li and J. Chandezon, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2247.

199. K. Hirayama, E.N. Glytsis, T.K. Gaylord, and D.W.Wilson, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2219.

200. P. Vahimaa and Jari Turunen, *J. Opt. Soc. Am. A* **14** (1997) 54.

201. P. Cornet, J. Chandezon, and C. Faure, *J. Opt. Soc. Am. A* **14** (1997) 437.

202. J.T. Sheridan, *J. Opt. Soc. Am. A* **11** (1994) 649.

203. J.T. Sheridan and L. Solymar, *Electron. Lett.* **26** (1990) 1840.

204. J.T. Sheridan and L. Solymar, *J. Opt. Soc. Am. A* **9** (1992) 1586.

205. J.T. Sheridan and L. Solymar, *Opt. Commun.* **94** (1992) 8.

206. G.L. James, *Geometrical theory of diffraction for electromagnetic waves*, IEE Electromagnetic wave series, (Peregrinus, London, 1976).

207. A. Ramsbottom, *Optoelectronics* **5** (1990) 606.

208. G. Campbell and R. Kostuk, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 1113.

209. M. Born and E. Wolf, *Principles of optics*, (Pergamon, Oxford, 1987), p. 706.

210. R.C. McPhedran *et al.*, *Opt. Acta* **29** (1982) 289.

211. N.A. Golias, E.E. Kriezis, and T.D. Tsiboukis, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 1147.

212. D. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, (Addison-Wesley, Massachusetts, 1988), p. 59.

213. Krishnakumar, en *Intelligent control and adaptive systems*, edited by G. Rodríguez, *SPIE* **1196** (1989) 289.

214. E.G. Johnson and M.A.G. Abushagur, *J. Opt. Soc. Am. A* **12** (1995) 1152.

215. D.N. Christodoulides and M.I. Carvalho, *Opt. Lett.* **19** (1994) 1714.

216. B.I. Sturman *et al.*, *J. Opt. Soc. Am. B* **11** (1994) 1813.

217. Y. Ohkawa, Y. Tsuji, and M. Koshiba, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1006.

218. E. Noponen and J. Turunen, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 1429.

219. M.C. Bashaw, J.F. Heanue, and L. Hesselink, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2174.

220. B.P. Kirsanov and M.V. Krongauz, *J. Opt. Soc. Am. A* **13** (1996) 2423.

221. D.W. Prather, M.S. Mirotznik, and J.N. Mait, *J. Opt. Soc. Am. A* **14** (1997) 34.

222. P. Lalanne and D. Lemercier-Lalanne, *J. Opt. Soc. Am. A* **14** (1997) 450.

223. B. Layet and M.R. Taghizadeh, *Opt. Lett.* **21** (1996) 1508.

224. S. Kaushik, *J. Opt. Soc. Am. A* **14** (1997) 596.

225. V. Zalipaev, *Opt. Lett.* **22** (1997) 1.